

일본 고속도로 터널의 내화성능 확보 방안 및 평가 사례 조사

김상용, 나진석*, 박준현*, 정훈*, 하영지*, 권영진**
 호서대학교 소방방재학과 건설 방화 및 방재 연구실,
 호서대학교 소방방재학과 교수·공박**

The Investigation Study on the Fire Resistant Performance and Evaluation Case study of Japanese Highway Tunnels

Sang-Yong Kim, Jin-Suck Na*, Joon-Hyun Park*, Hoon Jung*,
 Young-Ji Ha*, Young-Jin Kwon**

Lab for disaster Prevention & safety Technology.
 **Professor, Dep. of fire and disaster Prevention Eng.

1. 서론

최근 교통량, 수송량의 증가로 경제적 편의성에 의해 장대터널의 시공이 점차 증가하고 있는 추세이다. 일본 역시 경제적 편의성에 따라 터널의 시공이 증가하고 있다. 하지만 터널이란 구조체의 특징상 화재가 발생할 경우 인명피해 및 터널 붕괴 등 대형 참사로 이어질 가능성이 매우 크다.

1996년에 발생한 영·불 해협 터널 화재 및 1999년 몽블랑 터널 화재 사례 등을 보면 터널 화재가 발생할 경우, 인명 피해뿐만 아니라 급격한 온도 상승으로 인한 터널 구조 부재부의 응력 저하 및 터널의 손상이 발생하는 경우가 많고, 화재 후 복구까지 장시간이 소요되기 때문에 그로인한 2차적 손실이 가중되어 피해 규모가 상당하다는 것을 알 수 있다.

이에 따라 이미 유럽에선 1990년경부터 터널의 내화성능 확보 방안에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있고, 일본 역시 터널의 내화성능 확보에 대해 연구 중에 있다. 하지만 우리나라의 경우 터널 화재에 대한 내화성능 확보방안을 확립하지 못하였고 연구 또한 미비한 것이 현실이다. 따라서 일본 터널의 내화성능 확보 방안으로 선정되어 시공되어지고 있는 히다터널의 새로운 내화시공 공법과, 이에 사용될 소재의 선정 시험과정을 분석하고, 이 자료를 통해서 우리나라의 향후 터널내화공법의 발전 방향을 모색하고자 한다.

2. 터널의 내화 대책의 필요성

터널에서 화재가 발생할 경우 인명피해와 구조체의 붕괴 등 1차적 피해뿐만 아니라 그로 인한 장기간 터널 폐쇄로 교통 정체나 물자의 운송 중단 등 2차적 피해가 동반하여 발생하기 때문에 사회적으로나 경제적으로나 큰 피해가 발생하게 된다. 표1은 대표적 화재 사례를 통한 피해의 심각성을 나타낸 것이다. 표1의 피해액과 복구기간을 살펴보면 터널 화재로 인한 심각한 피해를 알 수 있다.

표1. 대표적 화재 사례

터널명	장소	발생 년도	연장 (m)	소화 소요시간	구조체 · 설비피해	피해액	복구 기간
영·불 해협터널 (Euro Tunnel)	영국- 프랑스	1996	50,000	-	터널연장 2km간 복공 콘크리트 박리	3억5천만\$	6개월
몽블랑 (Mont-blanc)	프랑스- 이탈리아	1999	11,600	-	900m 천장손상, 철근노출	2억7천만\$	3년
고타드 (Gotthard)	스위스	2001	16,900	37시간	250m 구간 천장부 콘크리트 붕괴	2천5백만\$	2개월
니혼자카	시즈오카	1979	2,045	7일간	천정판 낙하, 복공콘크리트 박리	3천3백만	2개월
미즈코시	나라현 고세시	2000	2,370	1시간 40분	아치에 거북등형 균열	-	-

3. 일본의 내화대책 변화배경

과거 일본에서의 터널의 내화 대책 확보 방안으로는 시공 공법에 의한 방법과 시공 후 유지 관리를 통한 방법이 사용되었으나, 최근 일본의 경우 1995년 규제 완화 정책 심의에서 터널의 위험물 차량 문제가 다루어진 이후 각종 규제 완화를 요구하는 사회적 흐름으로 인해 기존 법규에 의해 규제하던 것을, 획일적 규제는 아니지만 전반적 판단의 검토로 리스크 평가를 이용하고 있다.

(1) 기존의 터널 내화대책

- 시공공법에 의한 방법 - 터널을 시공하는 공법으로는, 주 하중을 담당하는 1차 복공을 2차 복공의 내화 피복으로 보호하는 쉴드 터널 공법과 복공과 지보의 기능을 분리하여 복공이 지보를 보호하는 NITM공법 사용.
- 시공 후 유지 관리 방법 - 유럽 등에서 사용되는 방법으로 장대 터널이나 하천 지하 터널의 경우 위험물의 반입 금지, 에스코트 방식 등으로 통행의 규제나 금지를 통한 방안.

(2) 내화대책의 변화

규제완화로 인한 터널 시공 시, 콘크리트 사용량 절감 및 굴착량 절감에 따른 시공 기간 단축 등, 종합적 비용 절감을 위해 새로운 시공 사례가 증가하고 있고, 시공시 2차 복공이 생략되어 시공 되고 있으며, 그로 인한 내화 공법과 재료를 필요로 함으로 내화공법과 내화재료 시험.

4. 일본에서의 내화 성능 확보를 위한 시험방법

히다 터널은 공정을 단축하는 방안을 모색하던 중 산악 암반 터널인 것을 고려하여 일 부구간을 2차 복공을 생략하여 시공되어지는 대표적인 일본의 장대터널로, 터널 구조 안정성과 화재 발생시 화열에 의한 터널의 박락 및 붕괴 방지를 위하여 내화 성능 확보함으로써 경제성과 안전성을 확보하기 위하여 유기 섬유 혼입 콘크리트를 이용한 폭 렬 억제형 세그먼트 방식을 적용하게 되었다.

3.1 내화성능 시험 방법

독일 및 일본에서 보편적으로 사용하고 있는 터널에서의 화재 발생 상황을 가정한 RABT곡선(최고 온도1200℃, 30~60분간 지속)을 이용하여 화재 시험을 실시하였다. 이 실험의 결과를 통하여 표면의 박리·박락 및 균열 등 시험체의 외적인 영향을 평가하는 내화 성능 시험과 내부 철근의 수열 온도를 통하여 1차 복공의 안전성을 예측하는 내부 열전대 위치에서의 온도 측정 시험 결과를 얻을 수 있다. 표2는 시험체 일람을 나타낸 것이다.

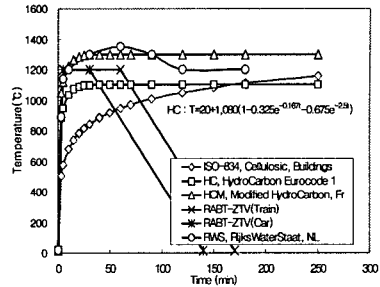


그림1. 각국 시간가열온도 분포 곡선

시험체 설정 시 주요 시험 변수로 프리캐스트 세

표2. 시험체 일람

시험체	PP섬유 혼입률 kg/m ³ (vol%)	충전 모르터	씰(seal) 틈새 mm	압축강도 N/mm ²
NO1	1.50(0.17)	-	-	17
NO2	1.20(0.13)	-	-	17
NO3	1.50(0.17)	FR-ECC	0.0	-
NO4	1.50(0.17)	M-10H	0.0	-
NO5	1.50(0.17)	S96C	0.0	-
NO6	1.50(0.17)	-	2.0	-

그먼트의 내화 성능을 평가하기 위하여 PP섬유를 1.5kg/m³, 1.2kg/m³ 혼입한 경우(NO1, NO2)를 설정하였으며 PC강선 접합부의 충전재에 대한 내화 성능을 평가하기 위하여 접합부에 내화 재료를 충전하여 시험체(NO3, NO4, NO5)를 제작하였다. 또한, 시공 시 발생할 수 있는 세그먼트 사이의 틈(gap=2mm)이 화재 시 씰재에 미치는 영향을 평가하기 위한 시험체(NO6)를 제작 하였다.

3.2 시험 항목 및 결과

(1) 시험 항목

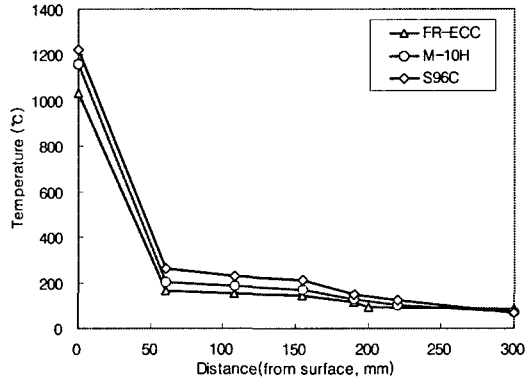
① 프리캐스트 세그먼트의 내화 성능 분석

프리캐스트 RC 복공 세그먼트에 PP섬유를 혼입한 시험체(NO1, NO2)는, 혼입된 PP섬유가 160℃정도에서 용융되어 콘크리트내부에 다수의 공극을 발생시켜 공극압을 저하시키고 열응력을 완화시켰기 때문에, 가열 직후 일부 구간에서 경미한 표면 탈락이 발생하였으나 폭렬은 발생하지 않았다.

RABT곡선에 의하면 피복 콘크리트에서는 445℃~1,116℃로 나타나 한계온도를 초과한 것으로 나타났지만, 그 외의 코어 콘크리트의 경우 모두 350℃ 이하의 온도 특성을 나타냈다. 콘크리트 속 매입된 철근의 경우 역시 65mm 깊이에서 350℃이하인 323℃ 및 319℃로 평가되어 화재 이후 피복 콘크리트의 재시공을 통한 간단한 보수만으로 콘크리트의 성능을 회복할 수 있다. 또 PP섬유의 혼입을 시험체인 NO2의 경우 역시 위의 조건을 만족하고 있어 PP섬유의 사용량을 완화시킬 수 있다. 이러한 실험 결과로 미루어 보아 PP섬유 혼입을 완화를 통해 재료의 유동성 및 시공 성능을 높일 수 있는 장점이 있을 것으로 사료된다.

② 접합부의 충전재에 대한 내화 성능 분석

실험 결과 NO4 시험체 에서만 충전재의 1/4정도가 폭렬에 의한 탈락이 나타났고, 콘크리트 세그먼트와 충전재의 온도 상승 차이에 의한 열팽창/수축 차이 및 불균등한 열응력에 의한 변형으로 시험체 모두에서 균열이 발생하였다. NO3(FR-ECC)의 경우 발생된 균열폭이 0.2mm에서0.3mm로 나타난 반면 NO4(M-10H), NO5(S96C)의 시험체에서는 최대 2mm의 폭이 발생하였으며 충전재를 가로지르는 균열도 관찰되었다. NO3 및 NO5 시험체에서는 시험 개시 5분 후부터 수증기가 분출하면서 표면 온도가 급격한 변동을 보이며 하강하는 특성을 보였다. 온도 특성은 세 시험체 모두 철근 위치인 표면으로부터 60mm에서 165℃, 261℃, 201℃로 한계 온도 이하이고 그 중 165℃였던 NO3가 가장 우수한 성능을 가진 것으로 평가 되었다.



③ 세그먼트 사이의 쉘재에 대한 내화 성능 분석

쉘재에 대한 내화 특성 평가를 위한 NO6 시험체의 경우 유의할 만한 폭렬 및 균열이 발생하지 않았다. 또한 쉘재 위치(표면으로부터 250mm)에서의 온도는 88℃로서 시공 시 세그먼트 사이의 틈이 쉘재에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었지만 콘크리트 내부에는 영향을 미치는 것으로 판단되어 시공 시 이러한 접합부에 대한 현장 품질 관리가 중요한 것으로 나타났다.

(2) 시험 결과

내화 성능 시험 결과는 표3에서와 같이 화열로 인한 폭렬 및 균열을 나타낸 것이며, 그림3은 시험체 내부의 온도 특성을 그래프로 나타낸 것이다.

표3. 내화 성능 시험 결과

시험체	NO1	NO2	NO3(ECC)	NO4	NO5	NO6
일반적 현상	콘크리트 표면에서의 경미한 박락	콘크리트 표면에서의 경미한 박락	미세한 폭의 균열	두드러진폭렬. 콘크리트와 충전재 경계면의 균열	콘크리트와 충전재 경계면의 균열	유의할 만한 폭렬 및 균열 미발생
폭렬	-	-	-	면적:150×120 깊이:12(mm)	-	-
균열	-	-	0.1~0.2 (mm)	1.5~2 (mm)	1~2 (mm)	-
사진						

위의 내화성능 시험을 통한 결과 NO1,NO2의 표면에서 경미한 박락이 발생하였고, 충전재의 경우 NO3가 미세한 균열의 발생만 일어나 가장 우수한 것을 알 수 있었다. NO6의 결과를 통해 세그먼트 사이의 틈새가 쉘재에는 별다른 영향을 미치지 않았으나

내부 콘크리트에는 영향을 미치는 것으로 나타났다.

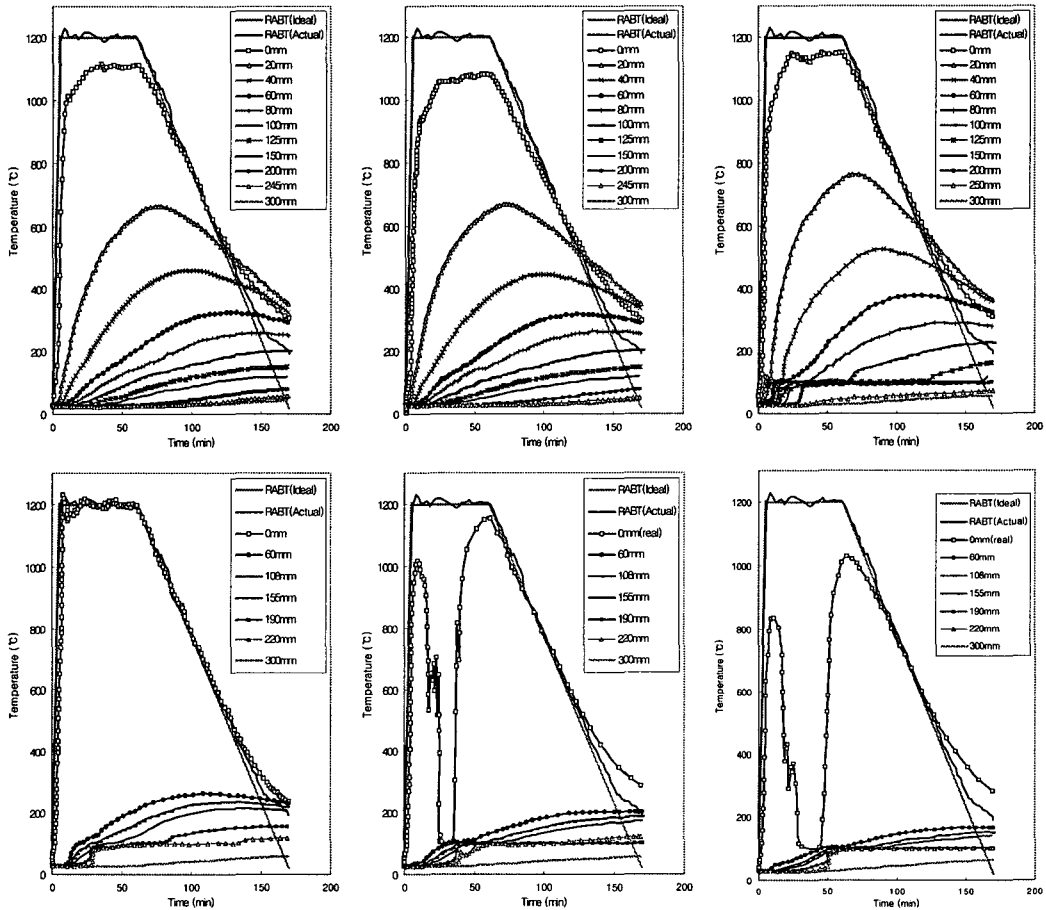


그림3. 내화 시험체의 내부온도 분포곡선

내부 온도 분포 곡선을 보면 NO1과 NO2의 결과가 비슷하였고, 충전재의 시험결과, 철근 위치인 표면으로 부터 60mm에서의 온도는 각각 165°C, 261°C, 201°C로 한계온도 350°C이하임을 알 수 있었고, 그중 NO3의 내화성능이 가장 우수한 것을 알 수 있었다. NO6는 철근 위치인 표면으로 부터 60mm에서의 최대온도는 376°C로써 틈이 없는 NO1 시험체의 동일위치에서의 온도 323°C보다 높게 나타났으나, 틈으로 인한 현저한 온도증가는 관찰할 수 없었다.

(4) 히다 터널의 내화 재료 선정

히다 터널에서는 실험 결과, 가장 우수한 성능을 나타낸 FR-ECC를 이용한 2차 복공 생략형 프리캐스트 RC 복공 공법을 채택하였다. FR-ECC는 고인성·고내화성 시멘트 모르타르로써 기존의 대표적인 터널 보수재료인 폴리머 시멘트 모르타르의 요구사항을 만족하고 있을 뿐만 아니라 내화성능까지 우수하기 때문에 터널의 보수/보강 및 내화공법에 매우 적합한 재료라 할 수 있다. 또한 재료의 역학적 성능인 휨 및 인장하중 하에서의 변형성능 및 균열제어성능

등이 탁월하여 하자 발생을 및 유지관리비용의 저감이 가능하고, 구조물의 고내구화가 가능할 것으로 사료되며 향후 활용 확대가 기대된다.

5. 결론

위의 실험을 통한 결과 전반적인 온도 분포 특성은 가열면에서 가까운 표면일수록 RABT곡선의 온도 이력과 유사한 온도 상승 및 하강 형태를 보였으나, 표면에서의 복사 및 대류에 의한 열전달 계수의 영향으로 외기 온도 조건인 최대 1200℃보다 낮은 1100℃정도를 나타냈다.

이에 일본 히다 터널에서는 가장 우수한 FR-ECC소재를 이용한 2차 복구 생략형 프리캐스트 RC 복구법을 채용하여 현재 시공 중에 있다. 이로 인해 시공의 합리화를 도모하여 최종적 코스트 절감을 이룰 수 있을 것으로 보이며, 화재 발생 시 사후 보수·보강이 용이하여 2차적 피해를 최소화 할 수 있을 것으로 예상된다. 이처럼 2차 복구 생략형 프리캐스트 RC 복구 공법은 향후 터널 콘크리트 구조물의 내화성능 향상에 기여할 수 있는 경제적인 내화 대책 공법으로 적용 가치가 높을 것으로 판단된다.

아직 내화 성능 확보 방안이 확립되지 않은 우리나라는 일본의 사례에서 보았던 것처럼 새로운 신소재의 개발·적용 및 설계 기법의 연구를 통한 구체적 내화 성능의 확보 방안을 우선적으로 하여 향후 터널 복구에서 요구되는 안정성, 안전성, 지수성, 사용성 등의 사항들을 종합적으로 갖추어야 할 것이다.

6. 참고문헌

1. 이종석, 안태승, “터널 화재에 대한 내화 필요성” 한국 구조물 진단학회 제 10권 제 5호 터널내화 특집기사 PP. 1~6
2. MORIYAMA Mamoru, Lim Seung Chan, ROKUGO Keitetsu, “일본 고속도로 터널에 있어서 내화성능 확보방안에 대하여” 한국 구조물 진단학회 제 10권 제 5호 터널내화 특집기사 PP.31~39
3. 한병찬, 권영진, 김재환, 장승엽, “고인성·고내화성 모르터(FR-ECC)를 이용한 RC터널 구조물의 내화공법” 한국 구조물 진단학회 제 10권 제 5호 터널내화 특집기사 PP. 32~36
4. 한병찬, 권영진, 김재환, “셸드 터널 프리캐스트 철근 콘크리트 라이닝의 내화 성능” 한국 콘크리트 학회 논문지 PP. 12~18
5. 한병찬, 권영진, 김재환, “화재온도를 받는 고인성·고내화성 시멘트의 복합체의 거동” 한국 콘크리트 학회 논문지 PP. 12~30